

折纸机器人

冯慧娟, 杨名远, 姚国强, 陈焱 and 戴建生

Citation: [中国科学: 技术科学](#); doi: 10.1360/N092018-00213

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/N092018-00213>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[基于PF-EKF的多机器人合作定位方法](#)

Science in China Series F-Information Sciences (in Chinese)**37**, 1544 (2007);

[机器人用热觉传感器的理论与实验研究](#)

Science in China Series A-Mathematics, Physics, Astronomy & Technological Science (in Chinese)**21**, 424 (1991);

[蛇形机器人步态转换CPG控制器](#)

Science in China Series F-Information Sciences (in Chinese)**37**, 1304 (2007);

[Stewart并联机器人位置空间解析](#)

Science in China Series E-Technological Sciences (in Chinese)**28**, 136 (1998);

[微型机器人的组成原理](#)

Chinese Science Bulletin **40**, 2107 (1995);



折纸机器人

冯慧娟^{1,2}, 杨名远^{1,2}, 姚国强^{1,2}, 陈焱^{1,2*}, 戴建生^{1,2,3}

1. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 天津大学机械工程学院, 天津 300072;

3. 伦敦大学国王学院机械工程系, 伦敦 WC2R 2LS 英国

* E-mail: yan_chen@tju.edu.cn

收稿日期: 2018-06-26; 接受日期: 2018-09-10; 网络版发表日期: 2018-10-26

国家自然科学基金创新研究群体(编号: 51721003)资助项目

摘要 21世纪以来, 随着折纸结构在工程领域日益广泛的应用, 折纸工程学这一新兴的交叉学科越来越受到人们的重视。刚性折纸作为折纸的一个重要分支, 以其折展过程中面内无应变的特点而被应用于工程结构的设计中。此外, 刚性折纸结构凭借良好的折叠特性也被大量用于机器人的设计中, 由此产生了折纸机器人。它兼具折纸结构和机器人各自的优点, 成为折纸工程学发展的新方向。根据折纸机器人中折纸结构所起的不同作用, 可将其分为三类: 骨架型折纸机器人、驱动型折纸机器人和外壳型折纸机器人。本文在总结国内外学者在此三大方向研究成果的基础上, 概述了其中的科学问题和技术方法, 最后得出未来折纸机器人骨架驱动一体化的发展是必然趋势的结论。

关键词 折纸工程学, 刚性折纸结构, 骨架型折纸机器人, 驱动型折纸机器人, 外壳型折纸机器人

1 引言

折纸是一门古老的民间手工艺, 大约起源于公元1世纪或2世纪时的中国, 6世纪时传入日本^[1], 7世纪时传入西班牙, 13世纪时广泛出现在欧洲的文学作品中^[2]。它是指用完整的纸张不借助裁剪、粘贴的方式, 只通过折叠弯曲的手法塑造各种空间艺术造型的过程。Origami一词源于日语, 在全世界范围内广泛使用, 因此现代折纸通常被认为是从日本发展起来的。20世纪初, 折纸艺术家Yoshizawa提出了折纸符号系统, 大大促进了折纸艺术的盛行^[3]。自1920年起, 随着计算能力的提升及艺术的发展, 折纸的设计更加复杂多样, 折

纸科学应运而生。其主要研究的是在数学与计算图学等领域中折纸的几何描述和纸片可折叠性等方面的问题。本世纪, 许多数学家、教育家、工程师和科学家开始不断探索折纸发展新方向, 他们发现可以将艺术折纸中的传统几何与折法参数化, 结合现代材料, 开发新结构和设备, 进而出现了折纸工程学^[4]。它是一门新兴的学科, 处于数学、机械、力学、材料、控制、生物、医学等多个基础学科的交叉领域, 是折纸与现代科学的有机结合。

作为折纸的一个特殊子集, 刚性折纸可通过沿预定折痕的折叠实现在不同状态之间的连续运动, 在成型过程中变形只发生在折痕区域, 而主体板面不发生

引用格式: 冯慧娟, 杨名远, 姚国强, 等. 折纸机器人. 中国科学: 技术科学, Feng H J, Yang M Y, Yao G Q, et al. Origami robots (in Chinese). Sci Sin Tech, doi: [10.1360/N092018-00213](https://doi.org/10.1360/N092018-00213)

扭曲或拉伸等变形。在折纸工程领域,大部分工程结构中使用的材料同普通纸张相比具有很大的刚性,因此刚性折纸在这些工程结构的折叠设计中应用潜力巨大,比如太阳能电池板、卫星天线、飞机机翼等的设计。为分析刚性折纸的运动, Dai和Jones在1999年首次提出可将折痕视为转动副,将折痕包围的纸面视为连杆^[5],从而将折痕交于一点的折纸模型等效为球面机构进行分析。由此,含有多顶点的折纸可被看作是由多个球面机构形成的多环路网格。2002年,他们进一步用平面机构和空间机构等效运动学方法分析了纸盒的折叠运动^[6]。此方法后被广泛应用于刚性折纸的运动分析中。

刚性折纸结构凭借其良好的折叠特性和大折展比的特点常被用于各种可展结构的设计中。近年来,科学工作者还将折纸技术用到了机器人的设计中^[7],在保留机器人自动作业等优势的基础上加入折纸的折叠特性,设计制作出了各式各样的折纸机器人,增加了其对环境的适应性。折纸机器人是通过折叠实现形态和功能的自动化机器^[8]。它通过设计材料折痕的几何实现所需的功能,从而将材料与机器紧密地结合起来。此外,用于制造折纸机器人的纸张或其他可折叠薄片材料在显著减少机器人重量和降低材料成本的同时也有利于环境保护^[9]。这些特性使得折纸机器人在医疗、太空探索、灾区搜救等方面都有着广阔的应用前景。对其发展现状的分析将有助于更好地理解折纸机器人发展面临的问题,并更准确地把握其未来发展的方向。

按照折纸结构在机器人中所起的不同作用,这里我们将其分成了骨架型折纸机器人、驱动型折纸机器人和外壳型折纸机器人。本文将从这三个方面系统地介绍前人的研究工作,并对折纸机器人的发展方向进行展望。

2 骨架型折纸机器人

骨架型折纸机器人是指在设计过程中将折纸结构作为其整体或部分身体骨架的机器人。折纸结构最突出的特点是变形,骨架型折纸机器人正是基于此特点设计而成的。此类机器人采用的可折叠材料相比于传统机器人所使用的材料具有质量轻、价格低的优点,在保证其变形能力的同时可以很大程度的减少机器人的重量,降低材料成本。目前已有的对骨架型折纸机器

人的研究主要可分为四大类,分别是行走类机器人、可变轮径机器人、机械臂/手和爬行机器人。

2.1 行走类机器人

行走类机器人是以折纸结构作为外部骨架或整体骨架的一类移动型折纸机器人。例如,麻省理工大学的Miyashita和Rus团队研制了一种微型折纸机器人^[10~12],它由一个展开面积为 1.7 cm^2 的聚苯乙烯层组成,仅重0.31 g,如图1所示。此机器人将折纸结构作为其身体骨架,通过自身包裹的磁铁在交替的外磁场远程控制下完成变身和运动。其可被用于执行各种不同的任务,包括游泳、搬运、爬坡和挖洞等。当它完成相应的任务时,还能在特定溶液中实现溶化自毁。该机器人具有微小、可移动、可变形、可溶解的特点,有望用于医学领域中,如清理堵塞的血管、清理消化道、清除癌细胞等。

2017年,NASA研发出了一种体型娇小的折纸机器人“PUFFER”,如图2所示。PUFFER只有智能手机般大小,能折叠自己的身体以顺利通过狭小的空间,适用于在狭小或环境恶劣的空间中执行探索任务。

考虑到折纸机器人受限于纸张尺寸的特点,Paik团队提出了将折纸机器人和可重构模块化机器人结合的概念,设计了一种可重构模块化的移动型折纸机器人Mori^[13],如图3所示。该机器人以一个近似二维的三角形为基本模块,将驱动控制系统集成在中间的三角形芯片上,通过外部的电源输入,实现模块的运动。该机器人同时具备模块化、可折叠性、可动性及多功能性等优势,具有广泛的应用空间。

目前机器人制造高度专业化、耗时且昂贵,现有

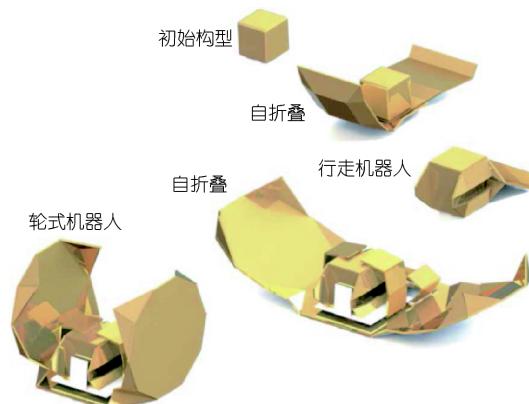


图 1 (网络版彩图)微型骨架型折纸机器人^[10]



图 2 (网络版彩图)火星探索机器人——PUFFER

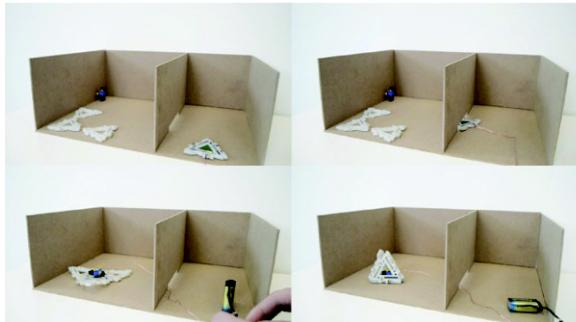


图 3 (网络版彩图)模块化折纸机器人——Mori^[13]

的快速成型技术(如3D打印)使得复杂几何形状的加工过程更加简单快捷; 然而, 它们仅限于一种或两种材料, 不能无缝集成有源元件. Felton等人和Onal等人提出了一种替代方法^[14~16], 称为可打印机器人. 他们利用平面制造方法获得集成机电层压板, 随后按照折纸的方式将其折叠成三维爬行机器人. 该机器人采用五层材料复合而成, 通过内嵌在印制电路板(PCB)中的加热元件实现聚苯乙烯(PSPS)收缩, 进而实现折纸机器人的自折叠过程, 如图4所示. 他们用此方法设计了一系列折纸机器人, 如自折叠纸鹤^[17]、自折叠灯具^[18]及自折叠自主导航机器人^[19]等.

Paik等人采用两种不同的方法, 即传统的多层功能材料集成法和多材料3D打印法, 制作了一种同时具有跳跃和爬行两种运动模式的折纸机器人样机Tri-bot^[20~22], 如图5所示. 通过比较发现, 使用3D打印可以实现功能层数量的最小化并减少制造时间. 这种方便快捷的设计制造过程创造了机器人开发的新范例, 它有望降低工业、家庭、教育、医疗等诸多领域机器人的设计制造成本.

目前用于驱动折纸机器人骨架折叠的方法多种多样^[23], 如聚合物薄膜收缩驱动^[24~28](图6(a))、形状记忆合金驱动^[29~36](图6(b))、气体驱动^[37~40](图6(c))等. 这

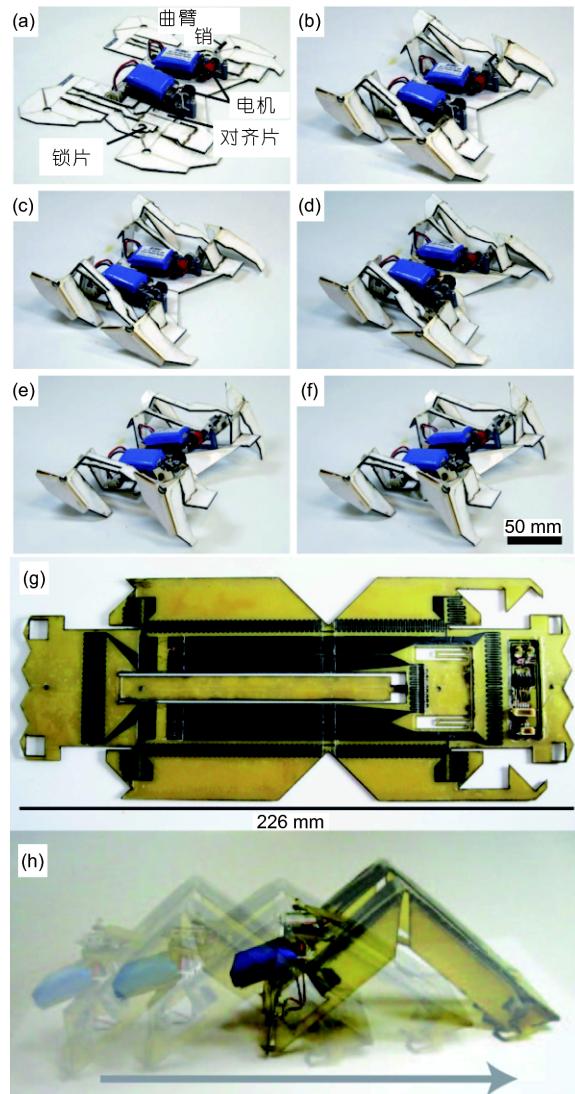
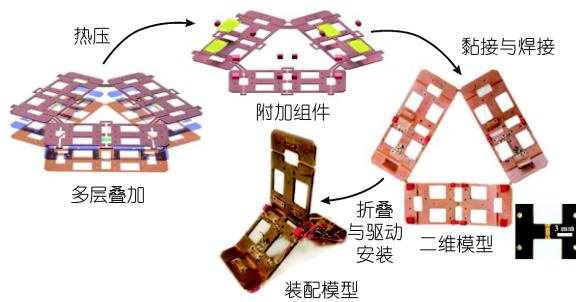
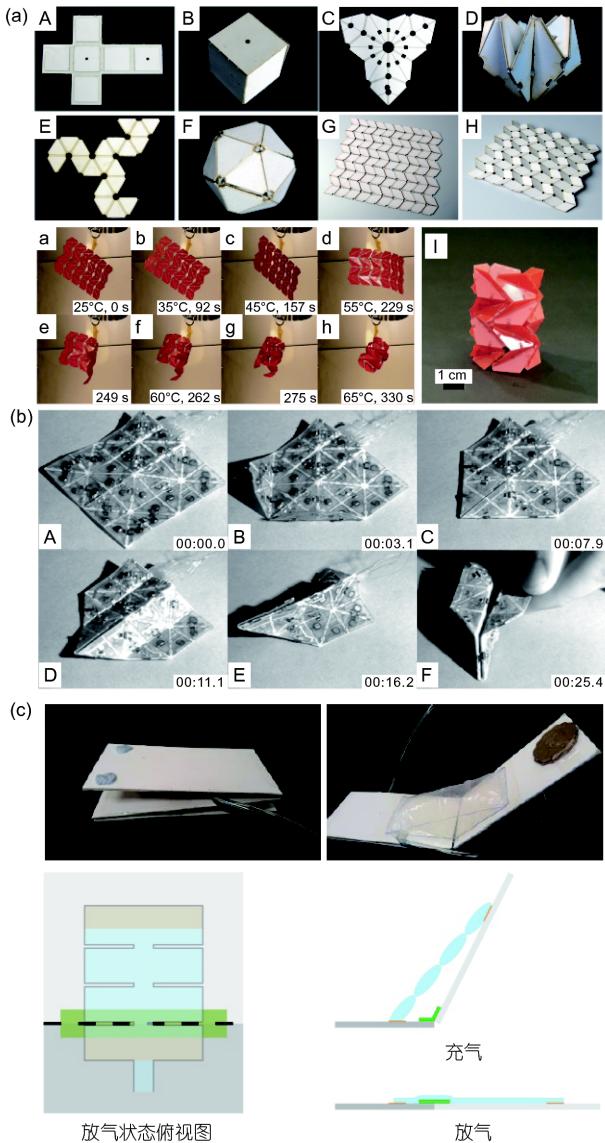
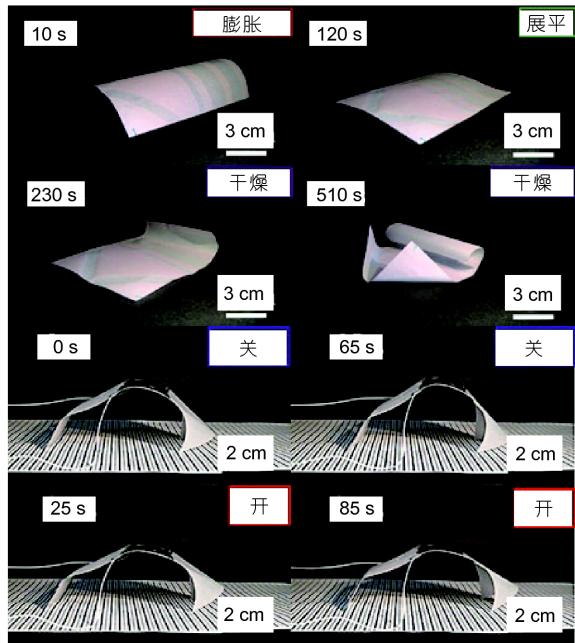


图 4 (网络版彩图)自折叠折纸机器人^[14,15]

些自折叠方法中, 形状记忆合金厚度小, 制造相对简单, 但其驱动需要引入控制电路, 且需要专业人士加工制作, 价格昂贵. 气体驱动需在片材表面附上气腔, 不能保证折叠面的光滑平整性. 综合考虑, 聚合物薄膜收缩驱动的折纸结构自折叠方法是价格较低、自折叠效果较好的驱动方式.

Shigemune团队开创了一个全新的领域——“折纸机电一体化”, 提出了一种在一张纸上同时打印驱动器和结构的方法^[41~43]. 他们打印了一个三层的电热式驱动器, 并利用纸张沿预定折痕图案的自折叠形成了机器人的三维主体结构, 以此制作了一台A7大小的折纸机器人. 该机器人可实现每步10 mm的移动, 如图7

图 5 (网络版彩图)三足多步态折纸机器人——Tribot^[22]图 6 (网络版彩图)不同驱动方式的自折叠骨架型折纸机器人。(a) 聚合物薄膜收缩驱动折纸结构自折叠^[24,25]; (b) 形状记忆合金驱动折纸结构自折叠^[29]; (c) 气体驱动折纸结构自折叠^[37,39]图 7 (网络版彩图)折纸机电一体化自折叠爬行机器人^[41]

所示。

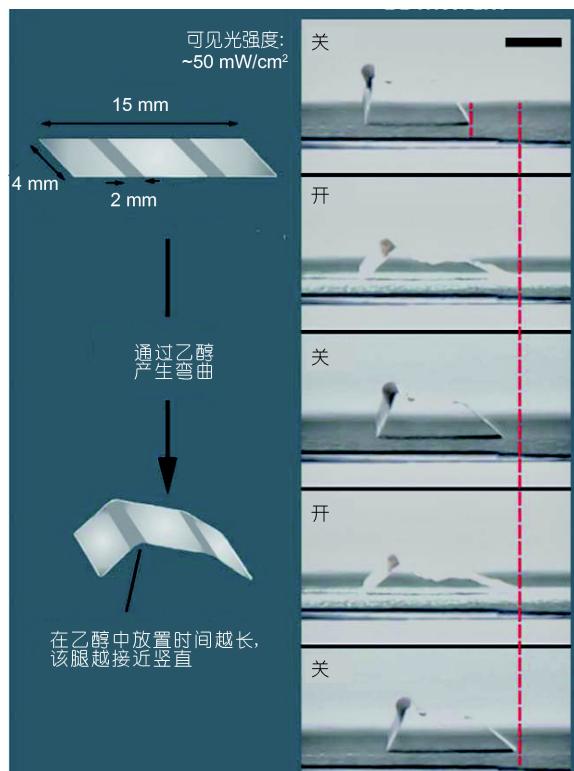
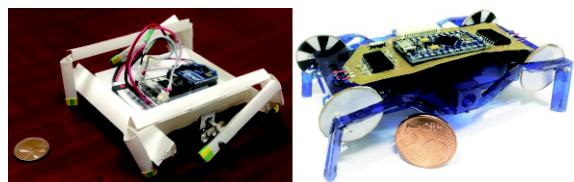
Kwan 等人设计了一款光驱动步行机器人^[44], 如图 8 所示。该机器人的前后腿上各具有一个驱动铰链, 通过可见光进行驱动。在制造该机器人时, 先将其放入乙醇中使铰链产生弯曲。根据放置时间的不同, 铰链的弯曲程度亦不同, 即前后腿高度不同。然后将其放入可见光环境中, 在光刺激下弯曲小的腿相比于弯曲大的腿移动得更快, 从而使该机器人在光线开关交替变化的环境下朝着光的方向前进。

还有一部分折纸机器人可通过折纸产生平面连杆机构等运动方式, 进而实现行走等功能^[45~47], 如图 9 所示。其优点是关节铰链部分是由纸张等材料构成的, 从而使得整个机器人骨架可一体化设计、加工和制造。

此外, 智能复合材料制造(SCM)方法也被用于制作一系列微型足式机器人^[48~58]和飞行机器人^[59~63], 这些机器人都采用弹出式组件方法制造机器人的身体骨架。图 10 给出了用此方法制造的六足折纸机器人的部分例子。这一制造方法利用了低成本、高精度的二维制造工艺, 使得同时集成机构、外骨骼和肢体传感的折纸机器人的低成本大批量生产成为可能。

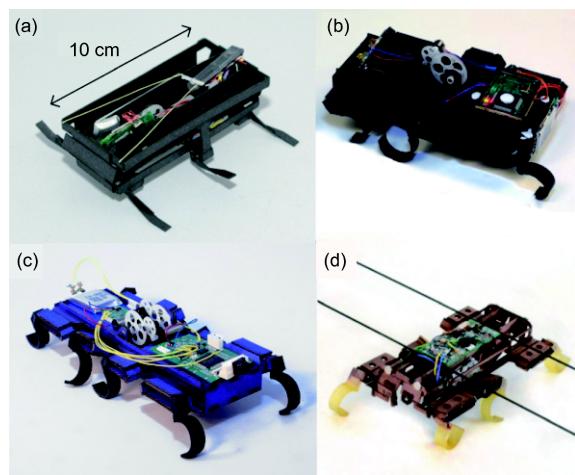
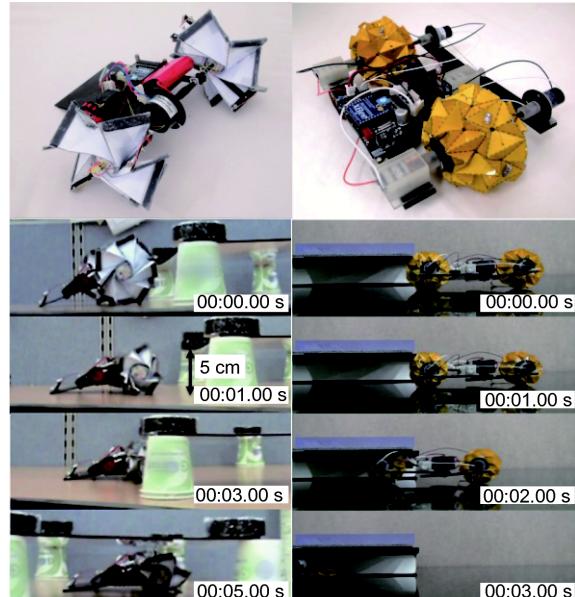
2.2 可变轮径机器人

除了上述将折纸结构作为外部骨架或整体骨架的

图 8 (网络版彩图)光驱动步行机器人^[44]图 9 (网络版彩图)由折纸构成关节的骨架型折纸机器人^[45~47]

机器人外,还有一些将折纸结构作为部分功能组块的机器人,如可变轮径机器人。首尔国立大学(Seoul National University)的Cho团队利用折纸结构大折展比的特性,设计制作了可变直径轮式机器人^[64~69],如图11所示。该轮子通过形状记忆合金驱动,改变其直径大小,可使机器人通过各种路况。大直径车轮可使该机器人越过一定高度的障碍物,小直径车轮可让其通过较低的狭缝。此外,通过控制两个车轮直径的不同,可实现其转弯运动。

Jeong和Lee基于折纸扭转塔(twisted tower)设计了一款轮式机器人^[70],其可通过折纸轮子的收缩和膨胀实现水陆两栖的运动。轮子宽度的变化提高了该机器

图 10 (网络版彩图)智能复合材料制造的骨架型折纸机器人^[48]图 11 (网络版彩图)可变直径轮式折纸机器人^[64,65]

人移动的能力,增加了其适应各种不同地面和水面环境的能力。

Le等人制作了一种可悬浮于水面上的无人机^[71,72],如图12所示。当该无人机位于水面时,其可利用waterbomb折纸结构的膨胀特性,通过增大与水的接触面积来加大浮力。而在飞行状态时,waterbomb折纸结构处于收缩姿态,从而减小了飞行过程中的空气阻力。该waterbomb折纸结构是由六折痕顶点组成的折痕图案折叠而成的,如图13所示,其中实线表示山线,虚线表示谷线。

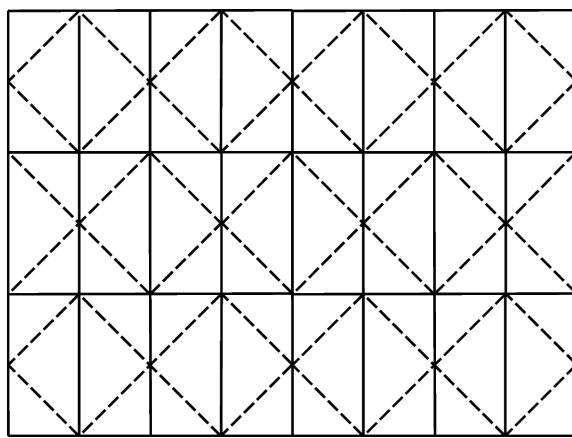
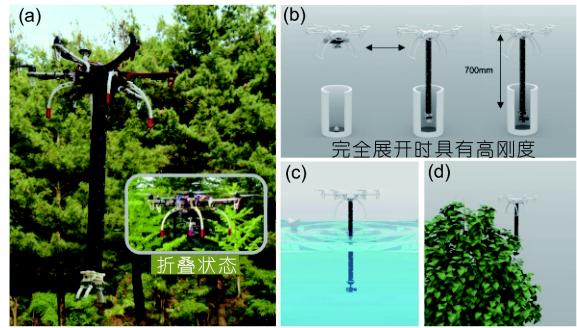
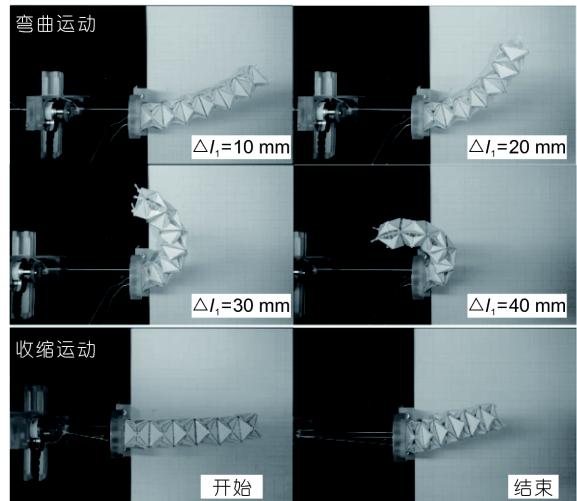
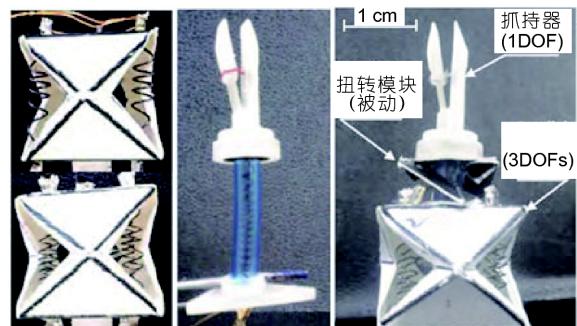
图 12 (网络版彩图)可悬浮于水面的无人机^[71]

图 13 waterbomb折痕图案

2.3 机械臂/手

在机械臂/手的设计制作中也可以看到折纸结构的身影。这类机械臂/手以折纸结构为基本骨架，通过金属丝等方式驱动，以实现弯曲、伸缩、抓取等操作。例如，Cho等人在无人机上加了一个可伸缩、可自锁的折纸机械臂^[73]，如图14所示。该机械臂在保持运动性能的同时，还具备轻质、紧凑、锁紧后刚度高等特点，使得无人机能进一步应用于水底或树枝间隙等各种受限环境中。

Dai等人提出了一种新型可扩展的连续型机械臂^[74,75]，如图15所示。该机械臂以waterbomb折纸结构为外部骨架，螺旋弹簧为内部柔性骨架，通过三根丝线驱动，可以实现弯曲和收缩运动。他们还将waterbomb折纸结构引入到微创手术机器人末端执行器的设计中^[76-78]，如图16所示。通过将一个能产生两旋转和一平移运动的并联折纸模块、一个扭转运动模块及一个柔性抓持器结合在一起，形成了一个新型四自由度机

图 14 (网络版彩图)具有自锁功能的可折叠机械臂^[73]图 15 (网络版彩图)连续型机械臂^[74]图 16 (网络版彩图)四自由度微创手术机器人末端执行器^[76]

械手，可实现夹持、移动等基本功能。

Paik团队设计了两种折纸机械手，一种是根据两点顶Miura折痕图案设计的三指折纸机械手^[79]，另一种是具有多种抓持构态及可调刚度的丝驱动折纸机械手^[80-82]，如图17所示。通过调节刚度，后者可实现柔性

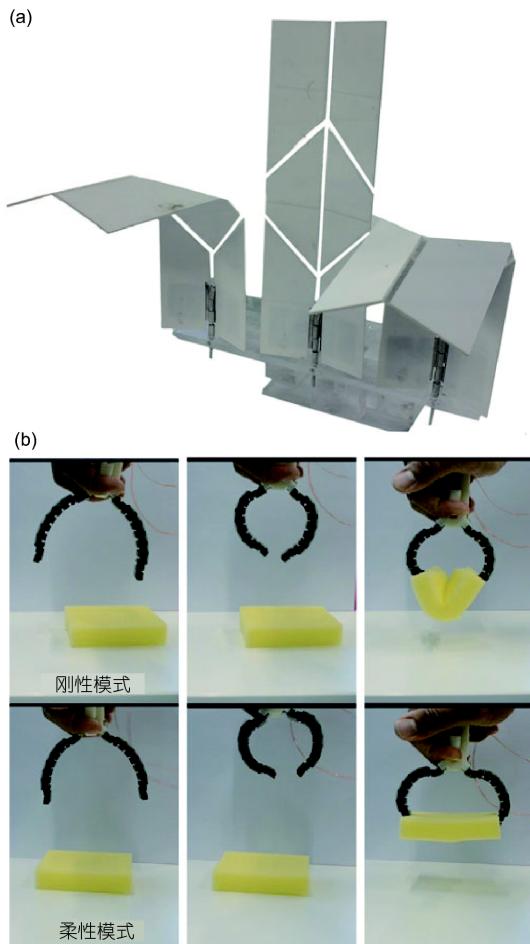


图 17 (网络版彩图)折纸机械手. (a) 基于Miura折痕图案的三指折纸机械手^[79]; (b) 具有多抓持构态及可调刚度的折纸机械手^[80]

模式下小物体的抓取及刚性模式下大物体的抓取, 提高了该机械手的自适应性和抓取的精确性.

与之类似的还有一种基于折纸扭转塔^[83]设计的具有三根手指的新型机器人操纵器OrigamiBot-II. 它由Lee团队^[9,83~85]设计, 其手臂由10层扭转塔组成, 通过四根金属丝驱动, 以实现手臂的全方向弯曲及收缩运动, 如图18所示. 每根手指由一个较小的11层扭转塔组成, 可实现手指向内弯曲的运动. 该机器人可实现羽毛球、蛋壳等难抓取或易损坏物体的抓取而不造成破坏.

2.4 爬行机器人

此外, 折纸结构还可以作为整个身体骨架来设计蠕动型爬行或蛇形机器人. 由于蠕虫拥有很好的地面



图 18 (网络版彩图)基于折纸扭转塔设计的机器人操纵器^[84]

和地下移动特性, 其形态特征和运动机制为爬行机器人的设计带来了新的启示. 例如, Lee团队利用折纸扭转塔制作了蠕动型爬行机器人OrigamiBot-I^[9], 如图19所示. 在四根金属丝的顺序驱动下, 该机器人可实现向前蠕动.

Dai等人受到一种具有螺旋运动的剪纸并联机构的启发, 设计了一种新型厘米级蠕虫机器人^[86], 此机器人能够实现收缩、弯曲和扭转等运动. Cho团队按照自然界中一种尺蠖的运动形式设计了一款蠕虫机器人Omegabot^[87,88], 该机器人由形状记忆合金驱动, 能适应在多种复杂环境中的运动. Wood团队设计了一种以waterbomb为外部骨架, 以形状记忆合金弹簧为驱动元件的仿蠕虫型爬行机器人^[7,89], 如图20(a)所示. 这种机器人非常简单, 只需要给形状记忆合金弹簧顺序通电, 即可实现机器人的爬行运动. 密歇根大学(University of Michigan)设计了一款仿蚯蚓型爬行机器人^[90,91], 如图20(b)所示. 他们将六段waterbomb管子连接起来, 得到一个类蚯蚓的折纸机器人原型, 用六个电机分别驱动各个管子的长度变化, 以实现与蚯蚓相同的蠕动方式.

管状折纸结构不仅可用于蠕动型爬行机器人的设计, 还能用于蛇形机器人身体框架的设计. 蛇形机器人具有灵活的身体躯干, 常被用于搜索救援等活动中. 然

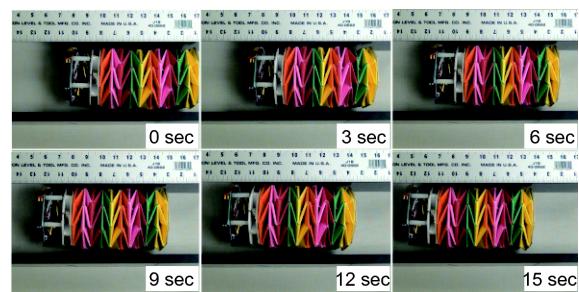


图 19 (网络版彩图)OrigamiBot-I爬行俯视图^[9]

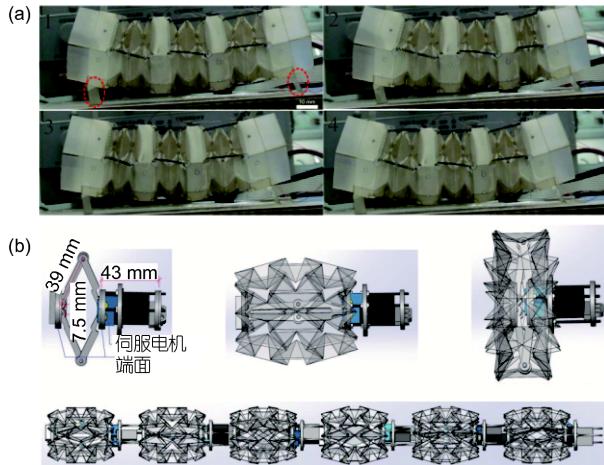


图 20 (网络版彩图)基于waterbomb的爬行机器人. (a) 形状记忆合金驱动的仿蠕虫型爬行机器人^[89], (b) 串联waterbomb组成的仿蚯蚓型爬行机器人^[90]

而, 由刚性连接件和铰链制成的蛇形机器人灵活性有限, 限制了它们在高度杂乱环境中的适用性. 伍斯特理工学院(Worcester Polytechnic Institute)开发了一种三维折纸蛇形机器人^[92,93], 如图21所示. 该机器人由若干个相同的模块单元组成, 能够模拟生物蛇的侧向蜿蜒步态和行波步态进行蛇行运动, 增加了其灵活性.

哈佛大学的Rafsanjani等人以一种特殊的剪纸结构作为皮肤, 包裹在气体驱动的软管外, 模仿蛇鳞的工作原理, 设计了一款仿生蛇形机器人^[94], 如图22所示. 该机器人依靠气体驱动软管实现剪纸皮肤的伸缩, 通过合理设计鳞片形状, 改善鳞片与地面间的摩擦性能, 使其在一伸一缩中向前蠕动.

3 驱动型折纸机器人

驱动型折纸机器人指的是折纸结构在其中充当驱动器作用的机器人. 相比于其他类型的驱动器, 折纸驱

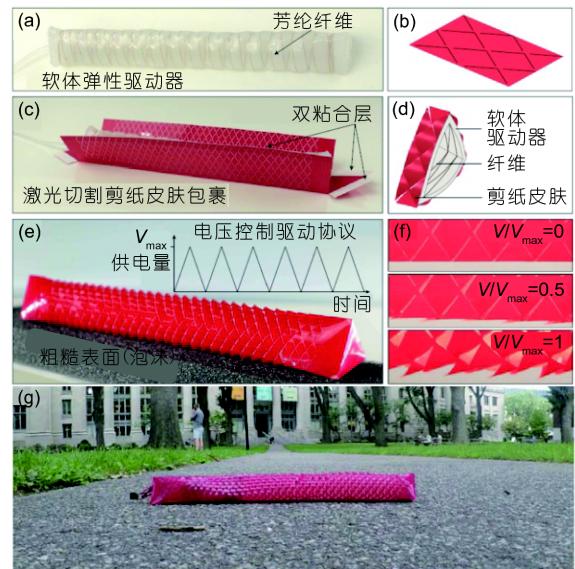


图 22 (网络版彩图)仿生蛇形机器人^[94]

动器加工制造简单、响应快、承载能力大. 此外, 利用折纸结构的特性, 折纸驱动器可以实现多种驱动方式, 如线性伸缩、弯曲、扭转等.

日本山梨大学(University of Yamanashi)的Okuzaki团队设计了一种以导电薄膜为基的折纸驱动器^[95,96]. 该驱动器利用湿敏导电聚合物薄膜在水蒸气分子的吸附和解吸作用下弹性模量发生电诱导变化的特性制作而成, 可在2 V的电压下实现2 cm/min的反复拉伸和收缩, 拉伸量可达147%. 该折纸驱动器装上腿部, 即可产生类似蠕虫的运动, 如图23所示.

在驱动器的研制上, Wood团队受折纸启发提出了流体驱动的人造肌肉^[97], 如图24所示. 该人造肌肉由可压缩骨架、柔性皮肤和流体介质组成. 将折纸结构密封在充满空气或流体的密封袋中, 折纸便充当了密封袋的骨骼, 不仅能提供密封袋的运动方向, 还能为它增加韧性. 如此以来, 简单的折纸结构便成为了集

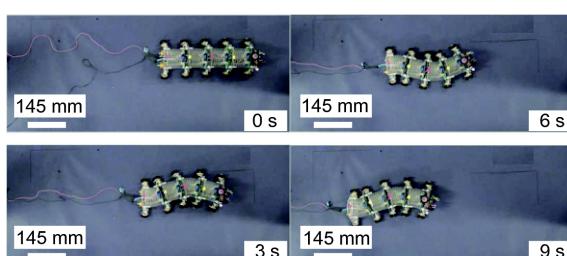


图 21 (网络版彩图)折纸蛇形机器人^[92]

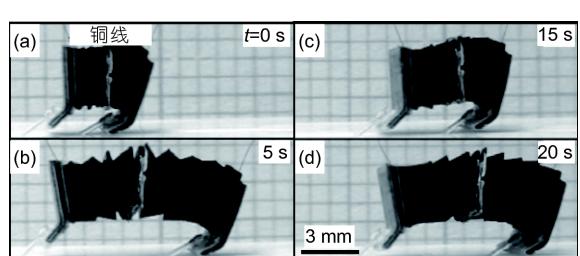


图 23 (网络版彩图)仿生折纸驱动器驱动机器人前进^[95]

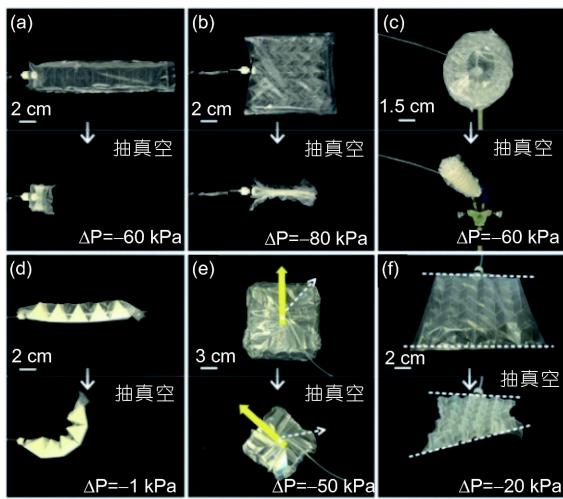


图 24 (网络版彩图)流体驱动的折纸型人造肌肉^[97]

柔性和韧性于一体的折纸驱动器,能够抓起各种形状的物品。该模型可被快速制造,且成本低廉,并通过对其结构进行编程设计实现多种运动方式,包括收缩、弯曲和扭转。此外,还可以通过改变骨架关节刚度实现顺序驱动。该人造肌肉可由负压(相对于环境)的流体驱动,比大多数正压流体驱动的人造肌肉更安全,有望为一般机器和机器人提供安全而强大的驱动。

除了上述将折纸结构作为内部骨架的驱动器外,Martinez等人^[98]提出了一种将折纸结构作为整体结构的复合材料气动柔性驱动器,如图25所示。该复合材料为内嵌纸张或纤维的弹性体,在伸缩过程中具有各向异性。通过改变复合材料的内部结构可实现不同的驱动方式,如弯曲、伸展、收缩、扭转等。这种驱动器价格低廉、制造简单、重量轻、易于启动,可提起自身重量120倍的重物。另外,它们还可以与其他组件(如

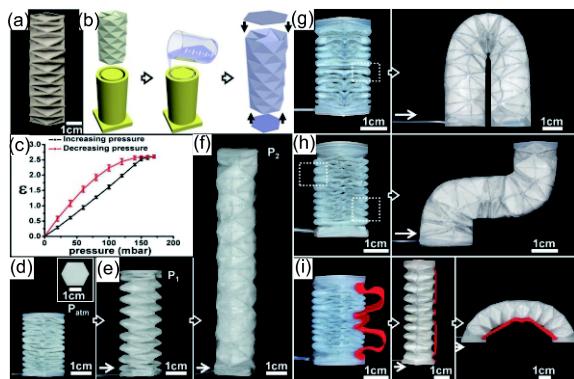


图 25 (网络版彩图)基于折纸结构的软体驱动器^[98]

电子组件)组合,以增加其功能。

还有一类驱动器同时集驱动与骨架功能于一体。这方面的工作主要集中在Pagano团队。他们基于Kresling折痕图案设计了一种仿生爬行机器人^[99],如图26所示。通过电机的旋转驱动折纸结构,即可实现整体结构的收缩和伸张,从而实现该机器人的单向移动。此外,利用Kresling折纸的双稳态特性,该机器人可实现快速的收缩和伸张。

另外,他们将此Kresling折纸作为内部骨架兼驱动器,给其加上外壳,制作了一种具有双稳态特性且能够伸缩自身长度大小的机器人构造模块^[100],如图27所示。采用不同的方式连接此模块,可获得一系列爬行机器人。该类机器人可利用脚上的定向摩擦力实现前进。

此外,若在其外壳内部采用两个折纸驱动器,可获得如图28所示的驱动型折纸机器人^[101]。这种折纸驱动器只需在末端施加一个旋转运动,即可产生类似于螺钉耦合式的伸缩运动。根据两个折纸驱动器运动程度的不同,可实现该机器人的前进和转向运动。

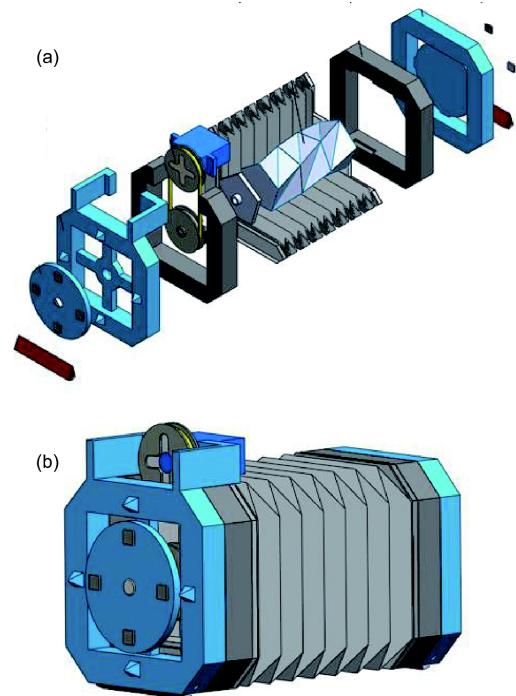
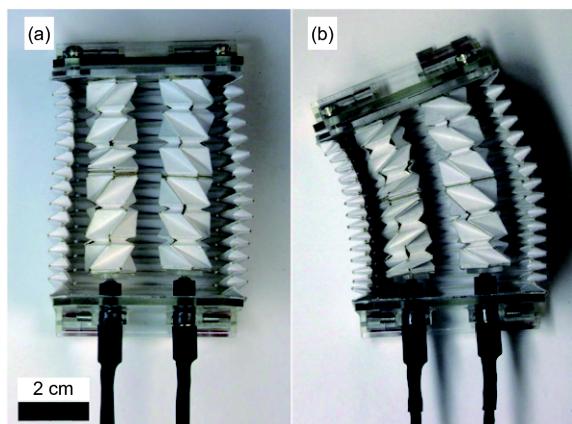
4 外壳型折纸机器人

外壳型折纸机器人是一类将折纸结构作为保护外壳的机器人。折纸外壳作为机器人本体的附加部分,该结构的折叠特性能够很好地匹配机器人本体的运动,其存在不会影响机器人的运动。此类机器人外壳制作简单、成本低、便于存储与运输。

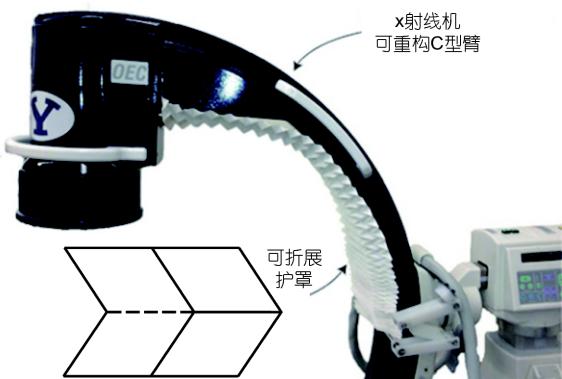
随着研究人员不断创造出符合实际用途的新折纸



图 26 (网络版彩图)多稳态爬行机器人^[99]

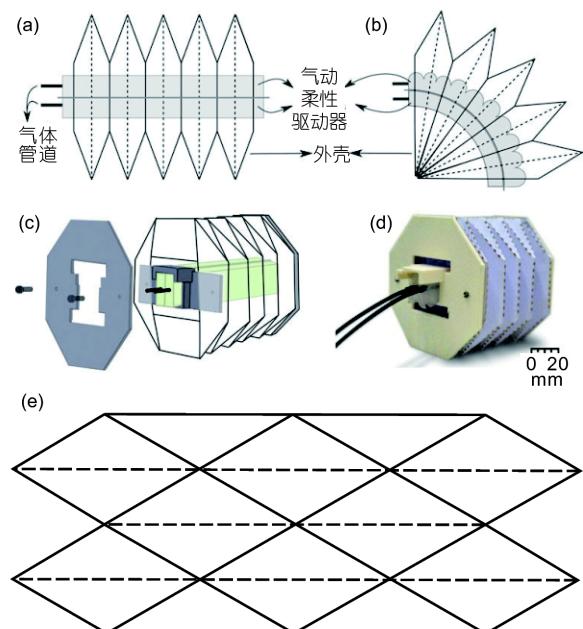
图 27 (网络版彩图)爬行机器人构造模块^[100]图 28 (网络版彩图)基于Kresling图案的折纸驱动型爬行机器人^[101]

结构,一些公司将折纸设计引入商业市场,实现了具有独特折叠功能的折纸机器人的产品化,发挥了折纸系统的优势。例如,通用医疗(GE Healthcare)最近与杨百翰大学(Brigham Young University)合作为医院手术室使用的X射线机的延伸臂提供了一个护罩^[102,103],如图29所示。该可调节护罩可以像手风琴一样伸展和收缩,以形成伸展手臂内的无菌环境。它是基于改进的

图 29 (网络版彩图)X射线机延伸臂折纸护罩^[102]

Miura-ori折痕图案开发而成的,可完美适应X射线机延伸臂的运动和几何形状。Miura-ori折痕图案由一系列平行四边形组合而成,在一个方向上,相邻的平行四边形相同;而在另一方向上,相邻的平行四边形互为镜像。其山谷线排布如图29所示。与已有的塑料护罩相比,这种护罩减少了每次手臂伸展需手动更换护罩的损耗,提高了时间效率,降低了成本。

此外,折纸结构也被用于气动柔性驱动器(SPA)的外壳设计中。目前所采用的SPA的外壳多为硅橡胶等材料,往往缺乏鲁棒性和可重复等特性。Paik团队设计了一种新型的外壳增强的SPA模块^[104],如图30所示。

图 30 (网络版彩图)外壳增强的气动柔性驱动器^[104]

该柔性驱动器被封装在基于Yoshimura折痕图案的折纸外壳中。该折痕图案由一系列六折痕的顶点组成，对角线上均为山线或均为谷线，如图30所示。作为附加保护层，该外壳在整个SPA运动过程中为其提供了特定的弯曲弹性，使其能够承受更高的充气压力，传递更大的阻抗并产生所需的运动。折纸外壳的使用克服了SPA运动精度有限和易磨损等固有缺陷，提高了其机械性能，扩大了其应用范围。

折纸结构可通过不同的折叠方式将二维平面材料转变成三维空间结构。这一特性大大简化了其制造过程，使得通过折纸形成的外壳可被快速设计制造，因此其常被用于制作轻质、短周期、多功能机器人的外壳^[105]，如图31所示。

当然，折纸材料并不局限于纸张，按照折纸方法设计出来的结构或机器人都可称为折纸结构或折纸机器人。Kornatowski等人基于折纸结构设计了一种可为无人机提供全方位保护的笼式结构^[106]，如图32所示。该结构将螺旋桨与环境隔离开以确保人身安全。无人机

和笼子可通过单一运动轻松折叠，折叠时其体积显著减少了92%，便于储存和运输。

在毫米级尺度的微型机器人研究上也可以看到折纸结构的身影。Miyashita团队设计了一种基于折纸的微型机器人^[107]，如图33所示。该机器人可通过人体自然腔道运动到所需位置，完成修补伤口、去除异物、输送药物等任务，最后在人体内降解。其实质是将折纸结构作为一种外部的保护壳，进入到胃部等器官后展开，通过翻转滚动实现体内移动，到达病变位置后将其内部的药物释放出来。

5 结论与展望

现如今，折纸机器人以其柔顺性好、折展比大、可平面加工、设计制作成本低等优点，越来越被科学工作者所重视。本文从骨架型折纸机器人、驱动型折纸机器人和外壳型折纸机器人三大方向介绍了国内外折纸机器人的发展及研究现状。

从文中可以看出，目前已有的对骨架型折纸机器人的研究较为系统和全面，主要集中在行走类机器人、可变轮径机器人、机械臂/机械手和爬行机器人四个方面。近些年，随着软体机器人的发展，驱动型折纸机器人以其响应快、承载能力大、控制精度高等优点也逐渐被大家所重视。而外壳型折纸机器人相关的研究较少，这主要是因为其主要利用的是折纸结构柔顺性好的特点，未充分发挥折纸的优势，应用前景比较有限。

通过分析折纸机器人现有的发展可以发现，这些折纸机器人虽然在一定程度上提高了机器人或驱动器的部分功能特性，却未将折纸结构的优势完全表现出

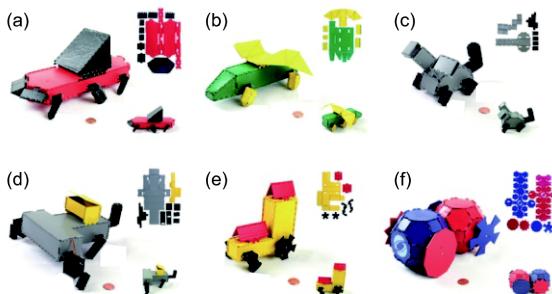


图 31 (网络版彩图)折纸外壳^[105]

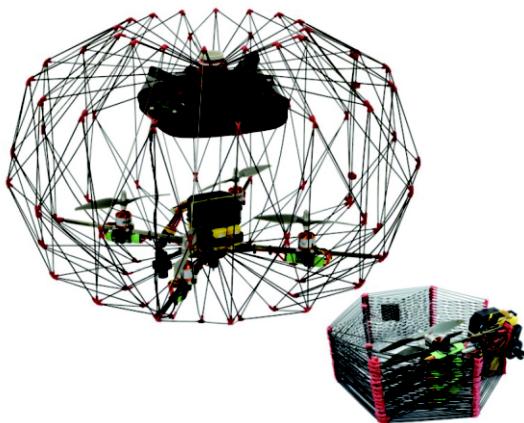


图 32 (网络版彩图)用于货物运输的可折叠四轴飞行器^[106]

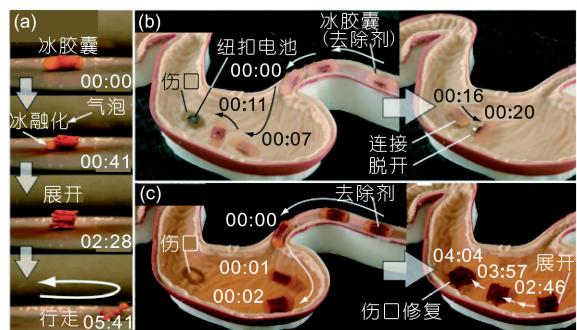


图 33 (网络版彩图)折纸外壳微型医疗机器人^[107]

来。比如大部分蠕动型爬行机器人都通过金属丝拖拽或记忆合金收缩来控制其整体长度,以实现伸缩效果进而产生蠕行的。实际上,若按照这种方式驱动任何一种可伸缩的结构都能产生类似的运动,并未发挥出折纸独有的优势。

因此,我们希望可以利用折纸的折叠特性来产生所需的运动,使折纸机器人朝骨架驱动一体化方向发展,即折纸结构既可充当机器人骨架,又可以产生驱

动运动。类似于图28所示的基于Kresling折痕图案的驱动器,只需在端部施加一个旋转运动,整个折纸结构就可以产生一个轴向伸缩的运动。该驱动器既利用了折纸的机构运动,又可以直接作为机器人骨架,如机械臂、蠕动型爬行机器人的身体躯干等。骨架驱动一体化的折纸机器人将完美结合折纸结构的折展特性、柔顺性和机构运动特性,是未来折纸机器人发展的必然趋势。

参考文献

- 1 Beech R. The practical illustrated encyclopedia of origami: The complete guide to the art of paperfolding. Anness, 2009
- 2 Demaine E D, O'Rourke J. Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra. Cambridge University Press, 2008
- 3 Hull T C. Origami design secrets: Mathematical methods for an ancient art. *Math Intell*, 2005, 27: 92–95
- 4 Hagiwara I. From origami to origamics. *The Japan Journal*, 2008, 5: 22–25
- 5 Dai J S, Jones J R. Mobility in metamorphic mechanisms of foldable/erectable kinds. *J Mech Des*, 1999, 121: 375–382
- 6 Dai J S, Jones J R. Kinematics and mobility analysis of carton folds in packing manipulation based on the mechanism equivalent. *Proc Institution Mech Engineers Part C-J Mech Eng Sci*, 2002, 216: 959–970
- 7 Onal C D, Wood R J, Rus D. Towards printable robotics: Origami-inspired planar fabrication of three-dimensional mechanisms. In: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2011. 4608–4613
- 8 Rus D, Sung C. Spotlight on origami robots. *Sci Robot*, 2018, 3: eaat0938
- 9 Vander Hoff E, Jeong D, Lee K. OrigamiBot-I: A thread-actuated origami robot for manipulation and locomotion. In: 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2014. 1421–1426
- 10 Miyashita S, Guitron S, Li S, et al. Robotic metamorphosis by origami exoskeletons. *Sci Robot*, 2017, 2: eaao4369
- 11 Miyashita S, Guitron S, Ludersdorfer M, et al. An untethered miniature origami robot that self-folds, walks, swims, and degrades. In: 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015. 1490–1496
- 12 Guitron S, Guha A, Li S, et al. Autonomous locomotion of a miniature, untethered origami robot using hall effect sensor-based magnetic localization. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2017. 4807–4813
- 13 Belke C H, Paik J, Mori A. A modular origami robot. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2017, 22: 2153–2164
- 14 Felton S, Tolley M, Demaine E, et al. A method for building self-folding machines. *Science*, 2014, 345: 644–646
- 15 Felton S M, Tolley M T, Onal C D, et al. Robot self-assembly by folding: A printed inchworm robot. In: 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2013. 277–282
- 16 Onal C D, Tolley M T, Wood R J, et al. Origami-inspired printed robots. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2015, 20: 2214–2221
- 17 Felton S M, Tolley M T, Shin B H, et al. Self-folding with shape memory composites. *Soft Matter*, 2013, 9: 7688–7694
- 18 Shin B H, Felton S M, Tolley M T, et al. Self-assembling sensors for printable machines. In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014. 4417–4422
- 19 Nisser M E W, Felton S M, Tolley M T, et al. Feedback-controlled self-folding of autonomous robot collectives. In: 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016. 1254–1261
- 20 Zhakypov Z, Falahi M, Shah M, et al. The design and control of the multi-modal locomotion origami robot, Tribot. In: 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2015. 4349–4355
- 21 Zhakypov Z, Belke C, Paik J. Tribot: A deployable, self-righting and multi-locomotive origami robot. In: 2017 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2017. EPFL-CONF-230280
- 22 Zhakypov Z, Paik J. Design methodology for constructing multimaterial origami robots and machines. *IEEE Trans Robot*, 2018, 34: 151–165
- 23 Peraza-Hernandez E A, Hartl D J, Malak Jr. R J, et al. Origami-inspired active structures: A synthesis and review. *Smart Mater Struct*, 2014, 23:

094001

- 24 Tolley M T, Felton S M, Miyashita S, et al. Self-folding origami: Shape memory composites activated by uniform heating. *Smart Mater Struct*, 2014, 23: 094006
- 25 Miyashita S, Onal C D, Rus D. Self-pop-up cylindrical structure by global heating. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2013. 4065–4071
- 26 Liu Y, Shaw B, Dickey M D, et al. Sequential self-folding of polymer sheets. *Sci Adv*, 2017, 3: e1602417
- 27 Miyashita S, Onal C D, Rus D. Multi-crease self-folding by global heating. *Artificial Life*, 2015, 21: 398–411
- 28 Jin B, Song H, Jiang R, et al. Programming a crystalline shape memory polymer network with thermo- and photo-reversible bonds toward a single-component soft robot. *Sci Adv*, 2018, 4: eaao3865
- 29 Paik J K, An B, Rus D, et al. Robotic origamis: Self-morphing modular robot. ICMC, 2012. EPFL-CONF-206919
- 30 Hawkes E, An B, Benbernou N M, et al. Programmable matter by folding. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 12441–12445
- 31 Paik J K, Kramer R K, Wood R J. Stretchable circuits and sensors for robotic origami. In: 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2011. 414–420
- 32 An B, Rus D. Programming and controlling self-folding robots. In: 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2012. 3299–3306
- 33 An B, Benbernou N, Demaine E D, et al. Planning to fold multiple objects from a single self-folding sheet. *Robotica*, 2011, 29: 87–102
- 34 Otani K, Matsumoto M. Development of an origami type robot to realize transformation and movement. In: Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Springer, 2014. 357–364
- 35 Firouzeh A, Paik J. Robogami: A fully integrated low-profile robotic origami. *J Mech Robotics*, 2015, 7: 021009
- 36 Firouzeh A, Sun Y, Lee H, et al. Sensor and actuator integrated low-profile robotic origami. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2013. 4937–4944
- 37 Du X, Wu H, Qi J, et al. Paper-based pneumatic locomotive robot with sticky actuator. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2016. 42: 03014
- 38 Wu H, Fang Y, Du X, et al. An untethered self-folding locomotive paper robot using pneumatic actuators. In: 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). IEEE, 2016. 766–771
- 39 Sun X, Felton S M, Niijima R, et al. Self-folding and self-actuating robots: A pneumatic approach. In: 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015. 3160–3165
- 40 Liu C, Felton S M. A self-folding robot arm for load-bearing operations. In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2017. 1979–1986
- 41 Shigemune H, Maeda S, Hara Y, et al. Origami robot: A self-folding paper robot with an electrothermal actuator created by printing. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2016, 21: 2746–2754
- 42 Shigemune H, Maeda S, Hara Y, et al. Design of paper mechatronics: Towards a fully printed robot. In: 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2014. 536–541
- 43 Shigemune H, Maeda S, Hara Y, et al. Kirigami robot: Making paper robot using desktop cutting plotter and inkjet printer. In: 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2015. 1091–1096
- 44 Kwan K W, Li S J, Hau N Y, et al. Light-stimulated actuators based on nickel hydroxide-oxyhydroxide. *Sci Robot*, 2018, 3: eaat4051
- 45 Agheli M, Faal S G, Chen F, et al. Design and fabrication of a foldable hexapod robot towards experimental swarm applications. In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014. 2971–2976
- 46 Askari M, Karakadioglu C, Ayhan F, et al. MiniIAQ-II: A miniature foldable quadruped with an improved leg mechanism. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2017. 19–25
- 47 Faal S G, Chen F, Tao W, et al. Hierarchical kinematic design of foldable hexapedal locomotion platforms. *J Mech Robotics*, 2016, 8: 011005
- 48 Haldane D W, Casarez C S, Karras J T, et al. Integrated manufacture of exoskeletons and sensing structures for folded millirobots. *J Mech Robotics*, 2015, 7: 021011
- 49 Birkmeyer P, Peterson K, Fearing R S. DASH: A dynamic 16 g hexapedal robot. In: 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2009. 2683–2689
- 50 Hoover A M, Burden S, Fu X Y, et al. Bio-inspired design and dynamic maneuverability of a minimally actuated six-legged robot. In: 2010 3rd

- IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BIOROB). IEEE, 2010. 869–876
- 51 Pullin A O, Kohut N J, Zarrouk D, et al. Dynamic turning of 13 cm robot comparing tail and differential drive. In: 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2012. 5086–5093
- 52 Haldane D W, Peterson K C, Bermudez F L G, et al. Animal-inspired design and aerodynamic stabilization of a hexapedal millirobot. In: 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2013. 3279–3286
- 53 Aukes D M, Goldberg B, Cutkosky M R, et al. An analytic framework for developing inherently-manufacturable pop-up laminate devices. *Smart Mater Struct*, 2014, 23: 094013
- 54 Hoover A M, Steltz E, Fearing R S. RoACH: An autonomous 2.4 g crawling hexapod robot. In: 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2008. 26–33
- 55 Kohut N J, Pullin A O, Haldane D W, et al. Precise dynamic turning of a 10 cm legged robot on a low friction surface using a tail. In: 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2013. 3299–3306
- 56 Hoffman K L, Wood R J. Myriapod-like ambulation of a segmented microrobot. *Auton Robot*, 2011, 31: 103–114
- 57 Baisch A T, Ozcan O, Goldberg B, et al. High speed locomotion for a quadrupedal microrobot. *Int J Robotics Res*, 2014, 33: 1063–1082
- 58 Kohut N J, Zarrouk D, Peterson K C, et al. Aerodynamic steering of a 10 cm high-speed running robot. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2013. 5593–5599
- 59 Ma K Y, Chirarattananon P, Fuller S B, et al. Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot. *Science*, 2013, 340: 603–607
- 60 Sreetharan P S, Whitney J P, Strauss M D, et al. Monolithic fabrication of millimeter-scale machines. *J Micromech Microeng*, 2012, 22: 055027
- 61 Wood R, Nagpal R, Wei G Y. Flight of the robobees. *Sci Am*, 2013, 308: 60–65
- 62 Rogers J, Huang Y, Schmidt O G, et al. Origami MEMS and NEMS. *MRS Bull*, 2016, 41: 123–129
- 63 Whitney J P, Sreetharan P S, Ma K Y, et al. Pop-up book MEMS. *J Micromech Microeng*, 2011, 21: 115021
- 64 Lee D Y, Jung G P, Sin M K, et al. Deformable wheel robot based on origami structure. In: 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2013. 5612–5617
- 65 Lee D Y, Kim J S, Kim S R, et al. The deformable wheel robot using magic-ball origami structure. In: ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2013. V06BT07A040-V06BT07A040
- 66 Lee D Y, Kim J S, Park J J, et al. Fabrication of origami wheel using pattern embedded fabric and its application to a deformable mobile robot. In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014. 2565–2565
- 67 Lee D Y, Kim J S, Kim S R, et al. Design of deformable-wheeled robot based on origami structure with shape memory alloy coil spring. In: 2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). IEEE, 2013. 120–120
- 68 Lee D Y, Kim S R, Kim J S, et al. Origami wheel transformer: A variable-diameter wheel drive robot using an origami structure. *Soft Robotics*, 2017, 4: 163–180
- 69 Lee J Y, Kang B B, Lee D Y, et al. Development of a multi-functional soft robot (SNUMAX) and performance in robosoft grand challenge. *Frontiers in Robotics and AI*, 2016, 3: 63
- 70 Jeong D, Lee K. OrigamiBot-II: An amphibious robot with reconfigurable origami wheels for locomotion in dynamic environments. In: ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2015. V04AT04A026–V04AT04A026
- 71 Le P H, Wang Z, Hirai S. Origami structure toward floating aerial robot. In: 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2015. 1565–1569
- 72 Le P H, Molina J, Hirai S. Application of Japanese origami ball for floating multirotor aerial robot. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2014, 8: 1740–1743
- 73 Kim S J, Lee D Y, Jung G P, et al. An origami-inspired, self-locking robotic arm that can be folded flat. *Sci Robot*, 2018, 3: eaar2915
- 74 Zhang K, Qiu C, Dai J S. An origami parallel structure integrated deployable continuum robot. In: ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2015. V05BT08A032-V05BT08A032
- 75 Zhang K, Qiu C, Dai J S. An extensible continuum robot with integrated origami parallel modules. *J Mech Robotics*, 2016, 8: 031010
- 76 Salerno M, Zhang K, Menciassi A, et al. A novel 4-DOF origami grasper with an SMA-actuation system for minimally invasive surgery. *IEEE*

- Trans Robot*, 2016, 32: 484–498
- 77 Zhang K, Salerno M, Dai J S. Origami-inspired SMA actuated constant velocity coupling for dexterous telesurgical robot and self-morphing medical robots. *Proc Hamlyn Symp Med Robot*. 2014, 71–72
- 78 Salerno M, Zhang K, Menciassi A, et al. A novel 4-DOFs origami enabled, SMA actuated, robotic end-effector for minimally invasive surgery. In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014. 2844–2849
- 79 Zuliani F, Liu C, Paik J, et al. Minimally actuated transformation of origami machines. *IEEE Robot Autom Lett*, 2018, 3: 1426–1433
- 80 Firouzeh A, Paik J. Grasp mode and compliance control of an underactuated origami gripper using adjustable stiffness joints. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2017, 22: 2165–2173
- 81 Firouzeh A, Paik J. An under-actuated origami gripper with adjustable stiffness joints for multiple grasp modes. *Smart Mater Struct*, 2017, 26: 055035
- 82 Firouzeh A, Salerno M, Paik J. Stiffness control with shape memory polymer in underactuated robotic origamis. *IEEE Trans Robot*, 2017, 33: 765–777
- 83 Liu T, Wang Y, Lee K. Three-dimensional printable origami twisted tower: Design, fabrication, and robot embodiment. *IEEE Robot Autom Lett*, 2018, 3: 116–123
- 84 Jeong D, Lee K. Design and analysis of an origami-based three-finger manipulator. *Robotica*, 2018, 36: 261–274
- 85 Wang Y, Lee K. 3D-printed semi-soft mechanisms inspired by origami twisted tower. In: 2017 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). IEEE, 2017. 161–166
- 86 Zhang K, Qiu C, Dai J S. Helical kirigami-enabled centimeter-scale worm robot with shape-memory-alloy linear actuators. *J Mech Robotics*, 2015, 7: 021014
- 87 Koh J S, Cho K J. Omega-shaped inchworm-inspired crawling robot with large-index-and-pitch (LIP) SMA spring actuators. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2013, 18: 419–429
- 88 Koh J S, Cho K J. Omegabot: Biomimetic inchworm robot using SMA coil actuator and smart composite microstructures (SCM). In: 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2009. 1154–1159
- 89 Onal C D, Wood R J, Rus D. An origami-inspired approach to worm robots. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2013, 18: 430–438
- 90 Fang H, Zhang Y, Wang K W. An earthworm-like robot using origami-ball structures. In: Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2017. International Society for Optics and Photonics, 2017. 10164: 1016414
- 91 Fang H, Zhang Y, Wang K W. Origami-based earthworm-like locomotion robots. *Bioinspir Biomim*, 2017, 12: 065003
- 92 Yan R, Luo M, Wan Z, et al. OriSnake: Design, fabrication and experimental analysis of a 3-D origami snake robot. *IEEE Robot Autom Lett*, 2018, 3: 1993–1999
- 93 Santoso J, Skorina E H, Luo M, et al. Design and analysis of an origami continuum manipulation module with torsional strength. In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2017. 2098–2104
- 94 Rafsanjani A, Zhang Y, Liu B, et al. Kirigami skins make a simple soft actuator crawl. *Sci Robot*, 2018, 3: eaar7555
- 95 Okuzaki H, Saido T, Suzuki H, et al. A biomorphic origami actuator fabricated by folding a conducting paper. *J Phys-Conf Ser*, 2008, 127: 012001
- 96 Okuzaki H, Kuwabara T, Funasaka K, et al. Humidity-sensitive polypyrrole films for electro-active polymer actuators. *Adv Funct Mater*, 2013, 23: 4400–4407
- 97 Li S G, Vogt D M, Rus D, et al. Fluid-driven origami-inspired artificial muscles. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2017: 201713450
- 98 Martinez R V, Fish C R, Chen X, et al. Elastomeric origami: programmable paper-elastomer composites as pneumatic actuators. *Adv Funct Mater*, 2012, 22: 1376–1384
- 99 Pagano A, Leung B, Chien B, et al. Multi-stable origami structure for crawling locomotion. In: ASME 2016 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. American Society of Mechanical Engineers, 2016. V002T06A005–V002T06A005
- 100 Angatkina O, Chien B, Pagano A, et al. A metameric crawling robot enabled by origami and smart materials. In: ASME 2017 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. American Society of Mechanical Engineers, 2017. V001T06A008–V001T06A008
- 101 Pagano A, Yan T, Chien B, et al. A crawling robot driven by multi-stable origami. *Smart Mater Struct*, 2017, 26: 094007
- 102 Johnson M, Chen Y, Hovet S, et al. Fabricating biomedical origami: A state-of-the-art review. *Int J CARS*, 2017, 12: 2023–2032

- 103 Morris E, McAdams D A, Malak R. The state of the art of origami-inspired products: A review. In: ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2016. V05BT07A014–V05BT07A014
- 104 Paez L, Agarwal G, Paik J. Design and analysis of a soft pneumatic actuator with origami shell reinforcement. *Soft Robotics*, 2016, 3: 109–119
- 105 Schulz A, Sung C, Spielberg A, et al. Interactive robogami: An end-to-end system for design of robots with ground locomotion. *Int J Robotics Res*, 2017, 36: 1131–1147
- 106 Kornatowski P M, Mintchev S, Floreano D. An origami-inspired cargo drone. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017. EPFL-CONF-230988
- 107 Miyashita S, Guitron S, Yoshida K, et al. Ingestible, controllable, and degradable origami robot for patching stomach wounds. In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016. 909–916

Origami robots

FENG HuiJuan^{1,2}, YANG MingYuan^{1,2}, YAO GuoQiang^{1,2}, CHEN Yan^{1,2} & DAI Jian S^{1,2,3}

¹ Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of the Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

² School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

³ Center for Robotics Research, King's College London, University of London, Strand, London WC2R 2LS, UK

Origami engineering has drawn increasing interest as a novel interdisciplinary subject since the beginning of this century with the wide application of origami structures in engineering fields. Rigid origami, an important branch of origami, has been used to design engineering structures since it has no strain in the facets during the deployment. Due to its excellent folding properties, rigid origami structures are also adopted in the design of robots, contributing to the generation of origami robots. Origami robots that combine advantages of both origami structures and robots have become a new trend for the development of origami engineering. According to different functions of origami structures in origami robots, there are three distinct types including origami skeleton robots, origami actuators and origami shell robots. This paper summarizes the research achievements together with scientific problems and technical methods in these three directions. Finally, the conclusion is drawn that the development trend of origami robots is the integration of origami skeleton robots and origami actuators.

origami engineering, rigid origami structure, origami skeleton robot, origami actuator, origami shell robot

doi: [10.1360/N092018-00213](https://doi.org/10.1360/N092018-00213)